3К

УДК 004.056.5:518:512.624.3

А.А. Кобозева
Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина
Alla_kobozeva@ukr.net

Использование особенностей возмущений сингулярных чисел матрицы цифрового изображения для обнаружения его фальсификации

Предлагается новый подход к решению проблемы обнаружения фальсификации цифрового изображения, основанный на анализе возмущений сингулярных чисел блоков матрицы изображения. Новый подход дает возможность локализовать область несанкционированного изменения исходного изображения.

Введение

Доказательство подлинности цифровых изображений (ЦИ), обнаружение их фальсификации является важной задачей во многих областях человеческой деятельности (работа с рентгенографическими и томографическими изображениями в медицине, судебные разбирательства, пресса, научные публикации и т.д.). Возрастающая актуальность рассматриваемой задачи в настоящий момент в значительной степени обязана последним успехам в технике синтеза изображений, а также общедоступности редактирующего изображения программного обеспечения.

Одним из эффективных инструментов доказательства подлинности ЦИ является использование техники цифровых водяных знаков (ЦВЗ) [1-3]. Основной недостаток этого подхода состоит в том, что ЦВЗ должен быть погружен в цифровой объект во время создания этого объекта, что ограничивает область применения метода только для механизмов генерации ЦИ, имеющих встроенные возможности погружения ЦВЗ.

В последнее время были предложены новые подходы к решению рассматриваемой задачи: метод автоматического детектирования характерных для фальсификации статистических корреляций, являющихся результатом передискретизации (re-sampling) изображений [4]; техника, основанная на оценке местоположения источника света, учитывающая световые различия, которые имеют место в случае, если изображение является комбинацией нескольких [5]; метод, основанный на выявлении результатов элементарных операций обработки изображения, используемых при его фальсификации (масштабирование, поворот, сглаживание и т.д.) [6].

Постановка задачи и цель исследования

Каждый из указанных выше методов имеет конкретную область применения. Большинство из методов не гарантируют обнаружение фальсификации ЦИ при ее наличии, а при обнаружении – не локализуют ее область. Это заставляет искать новые математические инструменты и подходы к решению рассматриваемой задачи в целом.

Глобальной целью автора является создание единого математического подхода к решению проблемы доказательства подлинности ЦИ, детектирования его фальсификации, независимо от вида фальсифицирующего воздействия.

Любая фальсификация ЦИ представляет из себя возмущение [7] матрицы (матриц) изображения, а значит, может быть представлена как совокупность возмущений сингулярных чисел (СЧ) и сингулярных векторов (СВ) исходной матрицы, однозначно определяемых ее нормальным сингулярным разложением [8]. **Глобальная задача** заключается в том, чтобы установить характерные признаки этих возмущений (или свойства СЧ и СВ), наличие или отсутствие которых даст возможность не только отделить фальсифицированное изображение от оригинального, но и локализовать область фальсификации.

Целью настоящей работы является создание начальных основ нового математического подхода к решению рассматриваемой задачи, базирующегося на теории возмущений и матричном анализе.

Характерные особенности сингулярных чисел

Пусть исходное ЦИ, хранящееся в некотором формате без потерь, например в формате TIF, разбивается стандартным образом на блоки 8×8 [9]. Если для каждого блока изображения определить сингулярный спектр (множество всех СЧ), то оказывается, что менее 10 % от общего числа блоков имеют нулевые СЧ (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты SVD блоков 8×8 изображений, хранимых без потерь

Изображение	Общее число блоков (ОЧБ)	Количество блоков, имеющих 1 нулевое СЧ	Количество блоков, имеющих 2 нулевых СЧ	Количество блоков, имеющих 3 нулевых СЧ	Количество блоков, имеющих 4 нулевых СЧ	Кол-во блоков, имеющих нулевые СЧ, по отношению к ОЧБ (в %)
POUT.TIF	1080	10	0	0	0	0,9
CAMERAMAN.TIF	1024	52	33	1	0	8,4
TIRE.TIF	725	9	0	1	0	1,4
MOON.TIF	2948	153	51	34	14	9
CELL.TIF	437	0	0	0	0	0

Данный факт не случаен. Ранг любой матрицы определяется количеством ее ненулевых СЧ [7], а значит, наличие нулей в сингулярном спектре будет говорить о том, что число ее линейно независимых строк (столбцов) меньше размерности. Однако для произвольного изображения, даже с учетом коррелированности значений яркости пикселей, вероятность того, что строки (столбцы) очередного блока окажутся линейно зависимыми, невелика. Чаще всего это возникает в случае коллинеарности двух векторов, либо когда рассматриваемый блок соответствует очень темной области изображения без контуров (все элементы матрицы блока близки к 0).

В настоящее время большинство цифровых камер используют для хранения изображений схему JPEG (с потерями), основанную на дискретном косинусном преобразовании (DCT), включающую 3 основных шага:

1. *DCT*. Матрица ЦИ разбивается на блоки 8×8, для каждого из которых выполняется сдвиг диапазона значений на 128 и прямое DCT.
2. *Квантование*. DCT-коэффициенты квантуются при помощи массива нормализации и округляются до ближайшего целого.
3. *Энтропийное кодирование*. Наиболее часто здесь используется процедура кодирования Хаффмана [9].

Восстановление изображения включает в себя шаги, обратные к перечисленным выше, в обратном порядке.

Поскольку шаг 3 JPEG-кодирования является обратимым, он не представляет для нас интереса с точки зрения определения характерных особенностей СЧ блоков восстановленного изображения, равно как и сдвиг диапазона значений яркости на 128. Поэтому в дальнейшем энтропийное кодирование и декодирование отдельно не рассматриваются, происходящий сдвиг диапазона для простоты изложения опускается.

Квантование коэффициентов DCT является необратимой процедурой и приводит к некоторым особенностям СЧ блоков.

Пусть исходное изображение подверглось JPEG-сжатию. Проведем для него операцию *частичного восстановления* (ЧВ), которая включает в себя: 1) энтропийное декодирование; 2) умножение полученных после первого шага коэффициентов на соответствующие элементы массива нормализации; 3) применение к полученным после второго шага коэффициентам обратного DCT, но без последующего округления. У полученной матрицы практически все блоки содержат нулевые СЧ, причем таких значений в блоках будет достаточно много (табл. 2 – в колонках 3 – 11 располагаются количества блоков матрицы, имеющих m нулевых СЧ). Такая ситуация закономерна. После квантования и округления коэффициентов DCT блоков многие из них, отвечающие высоким и средним частотам, обнулятся, оставаясь нулями после ЧВ. Существует соответствие между элементами дискретного преобразования Фурье и сингулярными тройками (σ_i, u_i, v_i) матрицы изображения, где σ_i, u_i, v_i – СЧ и отвечающие ему левый и правый СВ соответственно [7]. Сингулярные тройки наибольших СЧ максимально отвечают низкочастотным составляющим сигнала-изображения. По мере уменьшения СЧ происходит увеличение доли средних и высоких частот, а вклад низких становится все меньше. Наименьшие СЧ отвечают высокочастотным составляющим двумерного цифрового сигнала [8]. Если $F_k = \sum_{i=1}^{k} \sigma_i u_i v_i^T$ – *аппроксимация* ранга k изображения с матрицей F, $F_{k_d} = \sum_{i=k+1}^{N} \sigma_i u_i v_i^T$ – *дополнением к аппроксимации* F_k, $S_k = \sigma_k u_k v_k^T$ – k-ая *составляющая* F, то дополнения к аппроксимации и составляющие изображения при достаточно большом k практически не содержат низкочастотных составляющих [8]. Поскольку после ЧВ подавляющее большинство коэффициентов DCT, отвечающих высокочастотным (и средним) составляющим, становятся нулевыми, то нулевыми будут наименьшие (а возможно, и средние по величине) СЧ матриц блоков.

Таблица 2 – Результаты сингулярного разложения блоков 8×8 частично восстановленных изображений

Изображение	Общее число блоков	m									Кол-во блоков, у которых нулевых СЧ больше двух, по отношению к ОЧБ (в %)
		8	7	6	5	4	3	2	1	0	
POUT.TIF	1080	0	473	351	183	64	9	0	0	0	100
CAMERAMAN.TIF	1024	0	472	69	72	123	167	99	20	2	88
TIRE.TIF	725	20	168	112	117	141	123	43	1	0	94
MOON.TIF	2948	218	1624	464	387	182	68	5	0	0	99,8
CELL.TIF	437	0	303	31	17	54	28	4	0	0	99

Заметим, что, чем меньше нулевых СЧ в рассматриваемом блоке, тем больше линий контура он содержит. Действительно, наличие контуров в блоке говорит о значительной высокочастотной составляющей в сигнале, отвечающем этому блоку. Тогда коэффициенты DCT, соответствующие высоким и средним частотам, будут сравнительно большими и могут остаться ненулевыми после квантования и ЧВ, а значит, внесут свой вклад не только в максимальные СЧ.

Для наглядного представления справедливости вышесказанного рассмотрим изображение CAMERAMAN.TIF (рис. 1(а)), подвергшееся JPEG-сжатию и ЧВ. На рис. 1(б) представлена матрица, каждый элемент которой определяет количество нулевых СЧ в соответствующем блоке (далее такую матрицу будем называть матрицей нулевых СЧ блоков (МНСЧБ)) ЧВ-изображения. Элементы, значения которых 0, 1, 2, 3, выделены более насыщенным тоном, что позволяет наглядно увидеть соответствие между контурами исходного изображения и блоками, содержащими малое количество нулевых СЧ.



а б

Рисунок 1 – Исходное изображение (*а*) и МНСЧБ после частичного восстановления (*б*)

Таблица 3 – Результаты сингулярного разложения блоков 8×8 полностью восстановленных изображений

Изображение	Общее число блоков	m									Кол-во блоков, у которых нулевых СЧ больше двух, по отношению к ОЧБ (в %)
		8	7	6	5	4	3	2	1	0	
POUT.TIF	1080	0	473	126	125	110	93	93	29	31	86
CAMERAMAN.TIF	1024	0	472	51	37	58	70	109	81	146	67
TIRE.TIF	725	20	168	47	42	59	55	80	32	222	54
MOON.TIF	2948	218	1624	250	191	195	165	138	63	104	90
CELL.TIF	437	0	303	19	7	7	14	25	17	45	80

Пусть исходное изображение, подвергшееся JPEG-сжатию, восстанавливается полностью. Это означает, что после ЧВ все значения яркости пикселей округляются до целых и вводятся в диапазон $[0, 255]$. Это действие возмутит матрицу изображения, полученную после ЧВ, определенным образом изменится количество нулевых СЧ в блоках (табл. 3). Там, где после частичного восстановления не было

элементов, значительно меньших 0 или больших 255, возмущение матрицы будет небольшим. В соответствии с соотношением

$$\left|\sigma_i - \overline{\sigma}_i\right| \le \left\|E\right\|_2, \; i = \overline{1,n},$$

имеющим место для произвольной матрицы размерности $n \times n$ [7], где $\sigma_i, \overline{\sigma}_i$ – СЧ исходной и возмущенной матриц соответственно, E – матрица возмущений, $\left\|\bullet\right\|_2$ – спектральная матричная норма, СЧ являются нечувствительными к возмущающим воздействиям. Нулевые СЧ блоков матрицы ЧВ-изображения хоть и станут не нулями после полного восстановления, но их значения будут сравнимы с погрешностью округления, что не характерно для блоков исходного изображения. Для иллюстрации рассмотрим блок (27,8) изображения MOON.TIF. В исходном изображении сингулярный спектр этого блока имеет вид:

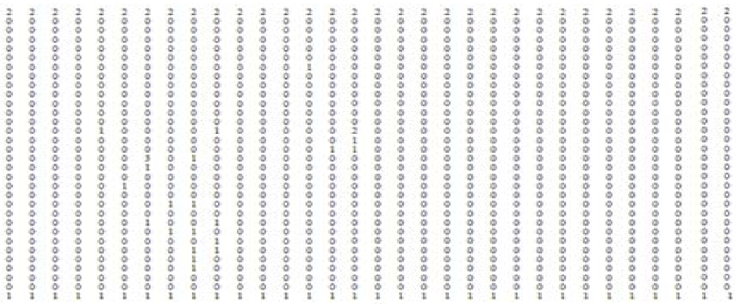
950.9198, 164.1247, 61.7382, 17.0963, 7.1338, 4.0991, 1.5753, 0.6998.

После JPEG-сжатия и частичного восстановления СЧ блока равны:

954.1724, 169.0268, 86.5101, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000,

а после полного восстановления:

947.8175, 167.5342 , 89.1161, 1.6238, 0.7192, 0.5034, 0.1063, 0.0160.



а



б

Рисунок 2 – МНСЧБ, отвечающая исходному изображению (*а*) и полностью восстановленному изображению (*б*)

Хотя последние 5 СЧ стали ненулевыми, но их значения незначительно отличаются от нуля и друг от друга и явно отличаются от трех максимальных. Такая особенность дает возможность различать блоки изображения, полностью восстановленного после JPEG-сжатия, и блоки исходного изображения.

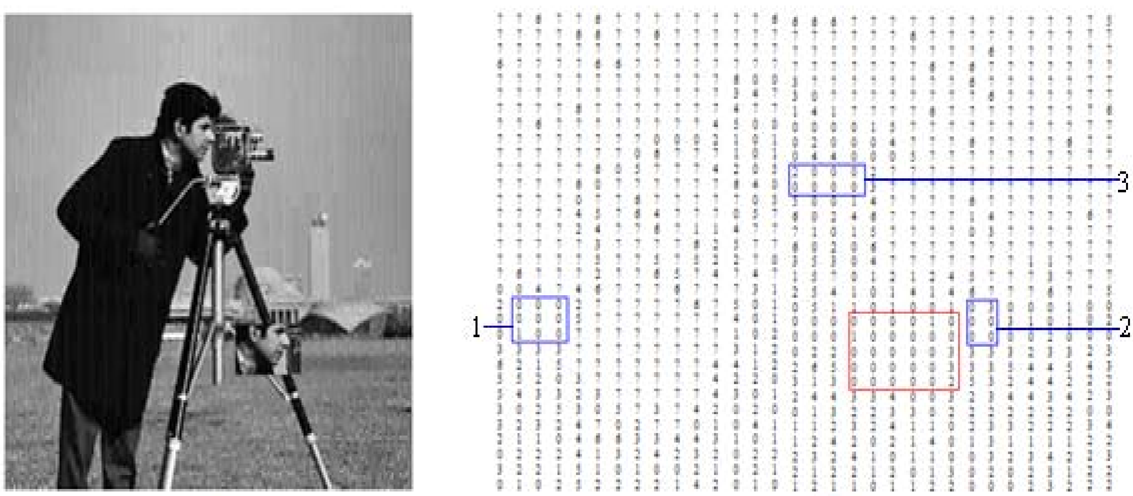
Наиболее заметным различие между совокупным исходным изображением и полностью восстановленным после JPEG-сжатия будет при сравнении их МНСЧБ. Типичная картина представлена на рис. 2. (изображение CAMERAMAN.TIF). Хотя значения 0, 1, 2, 3 присутствуют в обеих МНСЧБ, но количество нулей в первой матрице несоизмеримо превосходит количество нулевых значений второй матрицы, а элементы, равные 5, 6, 7, 8, в первой матрице отсутствуют вообще.

Обнаружение фальсификации

Будем считать, что в нашем распоряжении имеются фотоснимки, полученные современными цифровыми фотокамерами, то есть каждый из них – это полностью восстановленное после JPEG-сжатия изображение. Тогда соответствующие МНСЧБ будут иметь вид, аналогичный представленному на рис. 2(б).

Пусть часть фотоснимка, который будем называть *основным изображением* (ОИ), заменяется частью ЦИ, далее называемой вклейкой, или замещающей областью (ЗО), хранящегося в формате без потерь, причем для большей наглядности получаемых ниже выводов никакая последующая обработка изображения не производится. Такое фальсифицированное изображение (фотомонтаж) сохраняется без потерь. Пример на основе изображения CAMERAMAN.TIF, намеренно явно демонстрирующий вклейку, представлен на рис. 3(а). При построении МНСЧБ полученного фотомонтажа части, отвечающие ОИ и ЗО, будут отличаться по количеству нулевых СЧ блоков: подобласть МНСЧБ, которая соответствует вклейке, будет содержать большое количество нулей и значений, мало отличающихся от нуля (на рис. 3(б) эта часть ограничена).

Таким образом, для детектирования ЗО необходимо выделить в МНСЧБ связные области, содержащие нули и близкие к нулю значения. Однако такие совокупности могут отвечать: а) вклейкам; б) областям ОИ, где малое количество нулевых СЧ обязано округлениям, проводимым после частичного восстановления изображения (их наименьшие СЧ будут незначительно отличаться от нуля, что не свойственно вклейке); в) областям ОИ, у которых после квантования и ЧВ уже имелись малое количество нулевых СЧ, то есть областям, содержащим значительное количество контуров. На рис. 3(б) примеры областей б) и в) ограничены другим цветом. Очевидно, что различить области а) и б), сравнивая сингулярные спектры блоков, входящих в них, не представляет труда (табл. 4 – «вклейка» и «основное изображение» области 1, 2). Однако поведение СЧ блоков 3-ей части ОИ качественно неотличимо от поведения СЧ блоков ЗО и никак не выделяет вклейку.



а б

Рисунок 3. – Фальсифицированное изображение (*а*) и соответствующая МНСЧБ (*б*)

Таблица 4 – Сингулярные спектры различных областей фальсифицированного изображения

		Блок изображения	Сингулярные числа							
Вклейка		(21,19)	939,0048	106,2395	82,7256	63,2449	26,6378	17,8791	4,1803	0,1620
		(22,20)	819,4101	214,7784	199,6390	85,0353	45,4888	29,4758	21,3788	6,2910
		(23,20)	446,5187	227,7229	72,7133	53,4687	16,6807	4,3490	3,1316	1,1126
		(23,22)	1095,5	197,5	120,5	94,9	28,1	19,8	10,2	1,3
		(24,23)	659,2959	86,3697	16,8607	10,6777	6,6923	5,8589	2,7147	0,6267
		(25,22)	1099,9	289,7	134,4	72,8	50,5	33,3	8,8	2,2
Основное изображение	1	(20,3)	1175,8	96,4	57,9	21,8	7,2	0,7	0,4	0,4
		(20,4)	1122,3	106,1	63,1	38,6	14,9	0,7	0,6	0,1
		(21,2)	702,7781	28,2405	19,2169	13,1577	0,7773	0,5476	0,2373	0,0735
		(21,3)	675,3140	46,6384	39,9138	16,1638	8,7743	0,4852	0,4037	0,2509
		(22,3)	1035,5	111,0	3,.2	22,4	1,8	0,8	0,3	0,1
	2	(20,25)	1145,0	98,4	77,2	32,7	19,0	0,5	0,3	0,1
		(21,26)	1009,1	181,5	67,2	24,9	15,8	0,9	0,5	0,3
		(22,27)	768,9128	195,9938	95,1066	79,8180	13,2214	0,6426	0,4150	0,1462
	3	(11,17)	1001,6	223,7	180,4	136,7	106,6	60,3	6,6	0,5
		(11,18)	651,0872	124,1137	90,5530	59,1854	30,2031	21,4353	2,0865	0,6501
		(12,17)	1124,2	244,3	144,9	137,5	91,0	52,4	4,0	1,3
		(12,19)	1026,1	220,8	151,9	117,3	59,8	13,7	7,2	1,4

Проведем JPEG-сжатие для смонтированного изображения, но элементы массива нормализации возьмем меньше, чем использованные при первом квантовании коэффициентов DCT ОИ. Из сказанного выше вытекает, что второе квантование и ЧВ не должны качественно изменить картину для сингулярных спектров блоков 3-ей области ОИ. Действительно, отсутствие нулевых СЧ в блоках этой части, значительное отличие последних по порядку СЧ от нуля говорит о том, что эти блоки содержат большое количество контуров, то есть значительными являются коэффициенты DCT, соответствующие высоким и средним частотам. Если эти коэффициенты не обнулились при первом квантовании, то большая их часть останется ненулевыми и при втором, где коэффициенты квантования будут меньше. Для вклейки процесс квантования коэффициентов DCT будет первым, поэтому проявится картина результатов первого квантования – значительное увеличение количества нулевых СЧ в ее блоках. Проиллюстрируем вышесказанное на рассматриваемом примере.

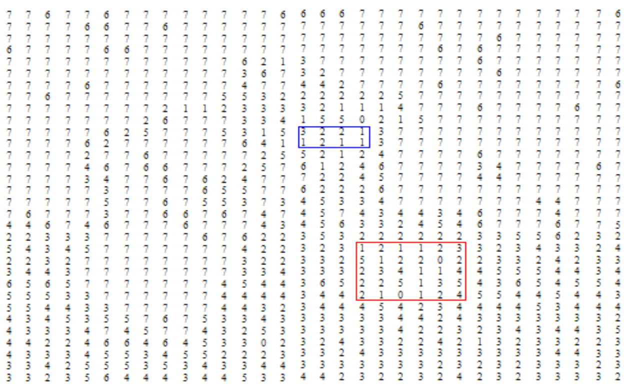


Рисунок 4 – МНСЧБ частично восстановленного после JPEG-сжатия смонтированного изображения



а

0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	3
0	0	0	0	0	3
0	0	0	0	0	2

б

1	2	2	2	2	1
6	6	5	5	4	4
5	7	6	6	5	6
5	5	6	6	6	4
2	3	1	1	2	4

в

Рисунок 5 – Фальсифицированное изображение (а), область МНСЧБ, отвечающая ЗО до сжатия (б) и область МНСЧБ, отвечающая ЗО после ЧВ (в)

При ЧВ смонтированного изображения, как и ожидалось, для области 3 ОИ картина количества нулевых СЧ в блоках изменилась незначительно (нулевые элементы матрицы стали 1 или 2). Для вклейки нулевые значения МНСЧБ изменились в диапазоне от 1 до 5 (рис. 4). Заметим, что в предложенном примере вклейка сама по себе содержит много контуров. Если же вклейка представляет из себя часть гладкого изображения с малым количеством или отсутствием контуров (рис. 5(а)), то отличить ее от области типа 3 ОИ будет значительно легче: элементы МНСЧБ будут больше отличаться от нуля после ЧВ изображения (рис. 5(в)).

Таким образом, если ОИ является результатом полного восстановления изображения после JPEG-сжатия, а ЗО – часть изображения, хранившегося без потерь, причем фальсифицированное изображение сохранено без потерь (TIF, BMP и т.д.), то основные шаги предлагаемого метода определения наличия вклейки и локализации ее области будут следующими:

1. Матрица анализируемого ЦИ разбивается стандартным образом на блоки 8×8, для каждого блока находится сингулярный спектр, результатом чего является МНСЧБ M_1.

2. В M_1 выделяются связные области $O_1, O_2, ..., O_m$ (не обязательно прямоугольные), абсолютное большинство элементов которых имеют нулевое значение. Эти области могут соответствовать вклейкам.

3. Из $O_1, O_2, ..., O_m$ удаляются те, для которых значительная часть минимальных СЧ блоков мало отличается от нуля. Пусть $O_{k_1}, O_{k_2}, ..., O_{k_p}$ – оставшиеся области. Если множество оставшихся областей пусто, то вклейки отсутствуют.

4. Анализируемое ЦИ подвергается JPEG-сжатию, при котором элементы массива нормализации будут меньше, чем для JPEG-сжатия ОИ, с последующим ЧВ. Для матрицы ЧВ-изображения получаем МНСЧБ M_2.

5. В матрице M_2 выделяем подобласти $\overline{O}_{k_1}, \overline{O}_{k_2}, ..., \overline{O}_{k_p}$, отвечающие $O_{k_1}, O_{k_2}, ..., O_{k_p}$ в M_1. Вклейкам соответствуют те из $\overline{O}_{k_1}, \overline{O}_{k_2}, ..., \overline{O}_{k_p}$, которые содержат значительное число элементов из множества {3, 4, 5, 6, 7, 8}. Если такие области не обнаруживаются, то вклейки отсутствуют.

Замечание. При формировании монтажа ОИ не использовались дополнительно операции обработки изображения для маскировки вклейки. Однако их применение не изменит характерных особенностей СЧ, выявленных выше, отличающих блоки ОИ от блоков ЗО, ведь основа этих отличий лежит в том, что ОИ было сохранено с

потерями, а вклейка без потерь. Заметим лишь, что размывка контура ЗО может привести к изменению картины полностью восстановленного после JPEG-сжатия изображения в областях ОИ, прилегающих к вклейке, что может помешать точному определению ее границы.

Выводы

Настоящая работа является первым шагом на пути формирования нового подхода к проблеме детектирования фальсификации цифрового изображения, использующего в качестве математических инструментов теорию возмущений и матричный анализ, что никогда не делалось ранее. Предложенный в работе метод на основе анализа возмущений сингулярных чисел блоков матрицы ЦИ дает возможность не только установить сам факт несанкционированного изменения цифровой фотографии, но и локализовать область такого изменения, не привлекая для этого никакие дополнительные технические средства, а также средства обработки полученного изображения. Вся анализируемая информация предоставляется непосредственно матрицей ЦИ.

Хотя предложенный метод рассматривает пока лишь частный случай фальсификации ЦИ, однако универсальность используемого подхода позволяет надеяться на возможность уйти в дальнейшем от конкретики фальсификации, анализируя лишь изменения СЧ матрицы изображения в результате возмущающего воздействия.

Литература

1. Kundur D., Hatzinakos D. Digital watermarking for tell-tale tamper proofing and authentication // Proceedings of the IEEE. – 1999. – Vol. 87(7). – P. 1167-1180.
2. Fridrich J., Goljan M., Du M. Invertible authentication // SPIE, Security and Watermarking of Multimedia Contents. – 2001.
3. Blythe P., Fridrich J. Secure digital camera // Proc. Digital Forensic Research Workshop. – 2004.
4. Popescu A. C., Farid H. Exposing digital forgeries by detecting traces of re-sampling // IEEE Trans. Signal Process. – 2005. – Vol. 53(2). – P. 758-767.
5. Johnson M.K., Farid H. Exposing digital forgeries by detecting inconsistencies in lighting // Proc. ACM Multimedia and Security Workshop. – New York. – 2005. – P. 1-10.
6. Bayram S., Sankur B., Memon N. Image manipulation detection // Journal of Electronic Imaging. – 2006. – Vol. 15(4). – P. 1-17.
7. Деммель Дж. Вычислительная линейная алгебра. – М.: Мир, 2001. – 430 с.
8. Кобозева А.А. Связь свойств стеганографического алгоритма и используемой им области контейнера для погружения секретной информации // Искусственный интеллект. – 2007. – № 4. – С. 531-538.
9. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

А.А.Кобозєва
Використання особливостей збурень сингулярних чисел матриці числового зображення для виявлення його фальсифікації
Пропонується новий підхід до розв’язання проблеми виявлення фальсифікації цифрового зображення, який базується на аналізі збурень сингулярних чисел блоків матриці зображення. Новий підхід дає можливість локалізовати область несанкціонованої зміни поданного зображення.

A.A. Kobozeva
Application of Image Matrix Singular Values Disturbances for Image Forgery Detection
New approach to a problem of image forgery detection based on analysis of singular values disturbances of image matrix is proposed in this article. This approach enables to locate range of unauthorized variation of original image.

Статья поступила в редакцию 09.01.2008.